

EL NIÑO, LA NIÑA Y LA PREDICCIÓN DE LA HIDROLOGÍA COLOMBIANA

Germán Poveda J. y Oscar J. Mesa S.
*Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos,
Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia,
Medellín, Colombia.*

RESUMEN

El fenómeno climático conocido como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) tiene dos fases extremas: El Niño (fase cálida) y La Niña (fase fría). Ambas fases afectan la hidro-climatología del planeta y en particular la parte tropical de América del Sur, incluyendo a Colombia. Esta oscilación ocurre en escalas de tiempo que van desde la mensual hasta la interanual (hasta 6 años). En general, El Niño produce períodos secos más fuertes y prolongados, y La Niña amplifica las lluvias y caudales máximos. Se presenta un análisis cuantitativo de la influencia de ambas fases en los caudales de 50 estaciones de medición en ríos de Colombia, para lo cual se estiman los histogramas de frecuencias, la media y la desviación típica de los caudales medios mensuales para los años de El Niño y La Niña, así como para el registro histórico completo. Para confirmar la fuerte influencia que ejercen los fenómenos oceánico-atmosféricos que ocurren en el Océano Pacífico sobre la hidrología de Colombia, se presentan análisis de correlación con el Índice de Oscilación del Sur y con las temperaturas del Océano Indo-Pacífico. Se discute el tema de la predecibilidad del fenómeno ENSO y de la hidrología y de la planificación de la operación y la expansión de sistemas de Colombia en el contexto de su dependencia con respecto al ENSO y al clima del O. Pacífico.

1. INTRODUCCIÓN

La planificación y operación de recursos hidráulicos se basa en la información histórica de las variables hidrológicas de interés para los planificadores. Esa información debe ser entendida y procesada adecuadamente para el buen diseño y funcionamiento de los sistemas de recursos hidráulicos. La consideración de la hidrología como parte de ciclos naturales que afectan a todo el planeta y que operan en distintas escalas de tiempo hace este problema aún muy delicado por sus implicaciones prácticas y teóricas. Una de tales implicaciones es la influencia que el clima del Océano Pacífico ejerce sobre hidrología colombiana, y en particular el fenómeno natural El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) influye sobre la variabilidad climática en escalas de tiempo que van de varios meses a varios años. Ver los trabajos de Montealegre y Pabón (1992), Poveda y Mesa (1993), Mesa et al. (1994a y b), Carvajal et al. (1994), Salazar et al. (1994a y b); Poveda (1994), Poveda y Penland (1994), Poveda et al. (1994), Poveda y Mesa (1995a, b, c y d). Tal dependencia ha sido demostrada a través de análisis estadísticos: correlaciones cruzadas, Funciones Ortogonales Empíricas, análisis espectral y otras técnicas, así como desde el punto de vista de los procesos físicos que causan las anomalías climáticas en el país.

La variabilidad climática condicionada por el ENSO tiene repercusiones hidrológicas fundamentales para Colombia. Todos los sectores que hacen uso del recurso agua se ven afectados por la ocurrencia de ambas fases del ENSO: El Niño (fase cálida) y La Niña (fase fría). Este hecho debe ser tenido en cuenta para efectuar predicciones hidrológicas y climáticas a diferentes escalas de tiempo. Los sectores eléctrico y agrícola de Colombia deben tomar plena conciencia de ello. Las decisiones que se tomen para desembalsar o asignar agua entre diversos propósitos y/o usuarios deben ser muy distintas si se está presentando o si se ha predicho

alguna de las fases extremas del ENSO. Ya existe total posibilidad de tener acceso en tiempo real a tales predicciones. Por otra parte, el hecho que la dependencia hidrológica de Colombia con respecto al ENSO sea más alta con un rezago de 2 a 4 meses proporciona un intervalo de tiempo propicio para producir buenas predicciones hidrológicas. Las correlaciones son del orden de 0.7, de manera que el ENSO está en capacidad de explicar aproximadamente el 50% de la variabilidad de la hidrología de Colombia, si se sustrae el ciclo anual. Además, las altas correlaciones persisten durante períodos mayores a los de la simple autocorrelación estadística.

Nos concentraremos en las anomalías hidrológicas de Colombia. Para ello, este trabajo se divide en las siguientes secciones. En el numeral 2 se hace una descripción general del fenómeno ENSO. En el numeral 3 se cuantifican los efectos de la ocurrencia de las dos fases del ENSO sobre los caudales medios mensuales de los ríos en Colombia. Se estiman los histogramas de frecuencias y los dos primeros momentos correspondientes a los años de las dos fases del ENSO y se comparan a la luz de los registros indiscriminados. En el numeral 4 se presentan mapas de iso-correlación entre las temperaturas de los océanos Índico y Pacífico y los caudales medios de ríos en diferentes regiones de Colombia, con el objeto de identificar las zonas del O. Pacífico que presentan las mayores correlaciones. En el numeral 5 se investigan las correlaciones cruzadas entre el SOI y los caudales medios, y en el numeral 6 se examina el tema de la predecibilidad de El Niño y se discuten algunas implicaciones para la predicción de caudales y para el problema de la operación y la expansión de sistemas de recursos hidráulicos en Colombia.

2. IMPLICACIONES GLOBALES DEL FENÓMENO ENSO

El Niño es un calentamiento anómalo de las aguas superficiales del centro y el este del Océano Pacífico tropical, el cual produce una profundización de la termoclina oceánica; está asociado con el debilitamiento de los vientos alisios del este y con el desplazamiento del centro de convección del oeste al centro del Océano Pacífico tropical. La Oscilación del Sur es una onda estacionaria en la masa atmosférica que

produce un gradiente de presiones entre el oeste y el este del Pacífico ecuatorial. Generalmente, un centro de alta presión se localiza cerca de Tahiti (18°S, 150°O) mientras que un centro de baja presión se localiza en Indonesia y el norte de Australia cerca de Darwin (12°S, 131°E). Este gradiente de presión es comúnmente representado por el Índice de Oscilación del Sur (SOI, por sus iniciales en idioma inglés), definido como la diferencia entre las presiones atmosféricas estandarizadas de ambos sitios. Las anomalías negativas del SOI están asociadas a los eventos cálidos sobre el océano (El Niño), y las anomalías positivas están asociadas con los eventos fríos (La Niña). El fenómeno ENSO produce fuertes perturbaciones sobre la circulación atmosférica global, y sus efectos climáticos tienen grandes implicaciones socio-económicas: sequías en África, en la parte tropical de América del Sur, en Australia, inundaciones en California, Perú, Ecuador y el sur-este de Sur América, entre otros. Algunas regiones experimentan efectos directos, mientras que otras son afectadas a través de teleconexiones atmosféricas (*Horel y Wallace, 1981; van Loon y Madden, 1981; Glantz et al., 1991*). El ENSO es un fenómeno cuasi-periódico con una recurrencia promedio de cuatro años, pero que varía entre dos y siete años (*Trenberth, 1991*). La explicación de la importancia de estas anomalías climáticas radica en el hecho que durante el ENSO se perturba el transporte oceánico-atmosférico de energía y momento angular desde el ecuador a los polos. Las anomalías en la precipitación tienen mucho que ver en ello (*Volland, 1988, p.224*), y se convierten en un jugador activo de las perturbaciones climáticas. Los efectos del ENSO sobre las variaciones del momento angular total de la Tierra, vía las anomalías en el momento angular atmosférico, son de tal magnitud que la longitud del día se alarga en el orden de 400 ms durante la fase cálida del ENSO, que se explica por razones de conservación del momento angular total del planeta (*Dickey et al., 1994*).

La influencia del ENSO sobre la hidrología global se manifiesta en escalas de tiempo que van desde varios meses hasta décadas (*Glantz et al., 1991; Philander, 1990; Diaz y Markgraf, 1993*). El fenómeno ENSO se da como resultado de las interacciones del sistema océano-tierra-atmósfera, y constituye la característica más dominante de las variaciones climáticas de corto plazo a nivel global (*Diaz y Kiladis, 1992; Rasmusson y Carpenter, 1982; Trenberth, 1991; Ropelewsky y*

Halpert, 1987). Las perturbaciones climáticas asociadas con el ENSO en América Latina son conocidas: México (*Cavazos y Hastenrath, 1990*), América Central y el Caribe (*Rogers, 1988*), Costa Rica (*Waylen et al., 1994*), Panamá (*Estoque et al., 1991*), Colombia (*Poveda y Mesa, 1993; Poveda, 1994; Mesa et al., 1994*), Venezuela (*Pulwarty et al., 1992*), Ecuador (*Gessler, 1994*), Perú (*Waylen y Caviedes, 1986; Tapley y Waylen, 1990*), en la cuenca Amazónica (*Marengo, 1992; Marengo y Hastenrath, 1993; Richey et al., 1989; Obregón y Nobre, 1990*), Brasil (*Kousky et al., 1984; Rao y Hada, 1990; Hastenrath y Greischar, 1993; Kayano et al., 1988; Chu, 1991*), Sur-este de Sur América (*Mechoso y Pérez Iribaren, 1992*), el trabajo comprehensivo sobre América del Sur de *Aceituno (1988 y 1989)*. Ver también los trabajos de *Kiladis y Diaz (1989)*, *Hastenrath (1990)*, y *Halpert y Ropelewsky (1992)*.

En general, existe buena coherencia entre las anomalías hidrológicas en la parte tropical de América del Sur (Colombia, Venezuela, Guyana y la cuenca del Amazonas) y las dos fases del ENSO. Con ciertas diferencias en el tiempo y en la amplitud, estas regiones exhiben anomalías negativas en lluvias y caudales durante El Niño, y lo contrario durante La Niña. Durante El Niño se da un desplazamiento del centro de convección hacia el sur-oeste de su posición normal, dentro del Frente Inter-tropical de Convergencia (FIC), sobre el trópico Americano (*Pulwarty y Diaz, 1993*). Este desplazamiento es ocasionado por el calentamiento de lengua fría de las aguas del Océano Pacífico afuera de las costas de Ecuador y Perú, y por los cambios en el contraste de temperaturas entre la tierra y el mar. Esto favorece la ocurrencia de períodos secos en el norte de Sur América y el Caribe, y causa lluvias extremas en Ecuador y Perú durante El Niño (*Kousky et al., 1984; Horel y Cornejo-Garrido, 1986; Waylen y Caviedes, 1986; Aceituno, 1988*).

3. HISTOGRAMAS DE FRECUENCIAS Y ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS EN AÑOS DE EL NIÑO Y LA NIÑA

La planificación y manejo de recursos hidráulicos debe considerar la predicción y/o la ocurrencia de eventos como el ENSO. Así, las decisiones sobre operación de embalses que se tomen en los meses y los años para los

cuales se tengan predicciones o se esté presentando El Niño deberán ser diferentes de aquellas para los meses normales y/o para los años de La Niña. Aquí es necesaria una salvedad: la relación entre la señal del ENSO y la de las variables hidrológicas en Colombia (como en todas partes) no es uno a uno. Varios factores lo producen: la intensidad, la amplitud y la duración de las fases del ENSO varían de evento a evento, además otros fenómenos están influyendo para modular la hidrología, a través de interacciones no-lineales con el ENSO. Y por supuesto, las interacciones no-lineales y de retro-alimentación entre los fenómenos geofísicos que se suceden en diferentes escalas de tiempo y la componente aleatoria de los mismos. Sin embargo, la modulación de la hidrología colombiana por parte del ENSO es bien clara, más aún si se examinan con rigor los procesos físicos que causan las anomalías climáticas (*Poveda y Mesa, 1995a, b*).

Para cuantificar el tipo de impacto que El Niño y La Niña tienen sobre los caudales en Colombia, se estimaron los histogramas de frecuencias, así como los dos primeros momentos de las distribuciones (media y desviación típica) para la totalidad de los registros y para los años de El Niño y La Niña. Para discriminar los años de El Niño y La Niña se usó la clasificación dada por *Kiladis y Diaz (1989)*, para el siglo XX. Años de El Niño: 1902, 1904, 1911, 1913, 1918, 1923, 1925, 1930, 1932, 1939, 1951, 1953, 1957-1958, 1963, 1965, 1969, 1972, 1976-1977, 1982-1983, 1986-1987 y 1991-1992. Años de La Niña: 1903, 1906, 1908, 1916, 1920, 1924, 1928, 1931, 1938, 1942, 1949, 1954, 1964, 1970-1971, 1973, 1975 y 1988. La estimación de los histogramas de frecuencias y de los parámetros estadísticos se realizó con el año comenzando en junio (año 0) y terminando en mayo del siguiente año (año +1), tanto para los caudales como para los valores del SOI. Esto se hizo por varias razones, entre ellas porque hay evidencias que indican que el fenómeno ENSO está en fase con el ciclo anual (*Webster, 1995*), tal como se confirma en el inciso 5, y su fase cálida (El Niño) parece tener cierta tendencia a comenzar a desarrollarse en la primavera del hemisferio Norte y a tener su máximo durante el invierno de ese hemisferio -el nombre de El Niño se debe a los pescadores peruanos, que notaban que el calentamiento del O. Pacífico se daba por el tiempo de navidad. Además porque la influencia sobre Colombia tiene un máximo para rezagos entre 3 y 4 meses (*Mesa et al., 1994*). Por otra parte, el mes de

mayo parece ser el menos afectado por ambas fases del ENSO, de acuerdo con las estimaciones que se efectuaron con el año hidrológico considerado de enero a diciembre, las cuales no se muestran aquí. En la Figura 1 se muestran los resultados para el río Magdalena en la estación de Puerto Berrío (Antioquia). Puede observarse que la media para los años de La Niña es 1.5 veces mayor que aquella para los años de El Niño y la desviación típica también es mayor. En la figura 2(a) se presenta el gráfico de los caudales promedios mensuales totales (línea gruesa) y los correspondientes a años de El Niño (triángulos) y a años de La Niña (cuadrados). En la figura 2(b) se presenta los valores para la desviación típica. Y en las figuras 2(c) y 2(d) se presentan los gráficos de las relaciones anomalía/caudal, en porcentaje, tanto para la media como para la desviación típica mensuales. Las figuras 3 y 4 corresponden al caso de Riogrande (RG-8, Antioquia). Los gráficos hablan por sí solos. En general, las tendencias en otras regiones de Colombia son similares, aunque con algunas variaciones regionales. En la Tabla 1 se dan los resultados de la estimación de la media y la desviación típica para los caudales medios mensuales de 50 estaciones de registro en ríos de Colombia, para el total de la muestra de caudales mensuales, así como para los años de El Niño y La Niña. Estos mismos análisis de la media y la desviación típica también se efectuaron para el nivel mensual, aunque los resultados no se muestran aquí en aras de la brevedad. Los resultados para el total de la muestra se presentan para contrastar los resultados en tareas de manejo de recursos hídricos.

4. INFLUENCIA DE LAS TEMPERATURAS DEL OCÉANO PACÍFICO EN LOS CAUDALES MEDIOS MENSUALES

Para ilustrar la influencia de las temperaturas del Océano Pacífico sobre los caudales medios en Colombia se estimaron sus coeficientes de correlación. Los registros de temperatura de la superficie del mar de COADS (*Slutz et al., 1985*) se promediaron sobre una malla de 4° (latitud) $\times 10^\circ$ (longitud) entre las latitudes 29°N - 29°S y entre las longitudes 30°E - 80°O , para un total de 342 sitios sobre el Indo-Pacífico, para el período entre 1959 y 1990. Se estimaron los coeficientes de

correlación de rezago cero entre tales series y las series de caudales mensuales de los 50 ríos en Colombia, usando los promedios móviles de 3 meses. Para ilustrar los resultados se presentan, en la figura 5, los mapas de iso-correlaciones. En la figura 5(a) para el río Magdalena en la estación de Puerto Berrío (Antioquia) localizada entre las cordilleras central y oriental en el centro de Colombia: correlaciones altas (negativas) con el promedio de las temperaturas del mar en las llamadas regiones Niño-3 (5°N - 5°S , 150°O - 90°O) y Niño-4 (5°N - 5°S , 160°E - 150°O) y en la región del monsoon indo-asiático. En la figura 5(b), las iso-correlaciones para el río Grande en la estación RG-8 en Antioquia, localizada sobre la cordillera occidental. En la figura 5(c), para el río Lebrija (Café Madrid, Santander) en la zona norte de la cordillera oriental, las correlaciones son similares en signo pero más bajas que en los dos casos anteriores. En la figura 5(d) para el río Ariguaní sobre la costa del mar Caribe, las correlaciones negativas son débiles en las regiones de Niño-3 y Niño-4, aunque las positivas en la zona de 130°E y 6°N no son despreciables. En la región de la Costa Caribe de Colombia, la influencia de la llamada Oscilación del Atlántico Norte (NAO; *Rogers, 1984*) parece tener un efecto importante (*Poveda y Mesa, 1995b*). Todos estos resultados confirman que las regiones Niño-4 y Niño-3 exhiben las mayores correlaciones con las lluvias y los caudales en Colombia (*Poveda et al., 1994*). Otros resultados no presentados aquí, muestran que el gradiente de las temperaturas del O. Pacífico entre las costas Colombiana y Peruana también es muy importante para explicar la situación hidro-meteorológica de Colombia.

5. CORRELACIONES ENTRE LOS CAUDALES DE COLOMBIA Y EL SOI

Las correlaciones cruzadas entre el SOI y los caudales de Colombia (promedios móviles de 6 meses) se presentan en figura 6. El SOI es el índice definido como la diferencia entre las presiones estandarizadas de Tahiti y Darwin. En los gráficos de la figura 6 se presentan los resultados de los coeficientes de correlación lineal para retrasos entre -12 y 12 meses. Los retrasos negativos corresponden al SOI adelante de los caudales y viceversa para los retrasos positivos.

Tabla 1. Media y desviación típica (m³/s) de los caudales medios mensuales en ríos de Colombia para el registro total y para los años de El Niño y La Niña. Los años hidrológicos se consideran de junio (0) a mayo (+1) .

Río (Estación, DEPTO.)	REGISTRO TOTAL		Años EL NIÑO		Años LA NIÑA	
	Media	Desv.Tip.	Media	Desv.Tip.	Media	Desv.Tip.
Zona Andina, Occidente						
Nare (Santa Rita, ANT)	46.50	19.74	37.28	16.00	62.18	21.11
Riogrande (RG-8, ANT)	33.8	12.2	28.6	9.9	43.2	13.4
Guadalupe (Troneras, ANT)	21.8	8.0	19.9	7.5	25.2	8.7
Sonsón (Sonsón, ANT)	2.77	1.13	2.32	0.71	3.64	1.53
Tenche (TC-3, ANT)	4.16	1.49	3.60	1.23	4.71	1.67
Nechí (La Esperanza, ANT)	859.3	363.2	781.4	353.1	953.3	349.7
Chichiná (El Retiro, CAL)	25.96	16.21	19.75	14.37	39.72	15.86
Otún (Banamera, RIS)	12.17	5.10	10.70	4.25	16.01	5.67
La Vieja (Cartago, VAL)	91.65	55.83	69.48	41.31	135.85	74.23
Jamundí (Potrerito, VAL)	5.34	3.43	4.57	2.84	7.21	4.02
Cauca (P. Valdivia, ANT)	1209.8	480.4	967.6	399.2	1505.2	432.8
Cauca (La Pintada, ANT)	744.1	386.5	564.5	282.2	1085.3	416.8
Cauca (Irrá, CAL)	672.0	343.6	515.0	263.9	988.6	371.4
Cauca (Anacaro, VAL)	414.1	211.2	319.9	164.6	593.6	232.1
Cauca (Juanchito, VAL)	277.3	140.1	222.9	107.5	374.0	173.3
Cauca (La Balsa, CAU)	197.3	97.8	163.9	73.4	264.7	122.5
Cauca (Julumito, CAU)	24.8	8.9	22.7	8.8	29.2	9.3
Piendamó (Carretero, CAU)	8.24	4.15	7.34	3.59	9.85	4.38
Palo (Bocatoma, CAU)	16.89	9.53	13.30	7.77	22.84	11.03
Micay (Angostura, CAU)	280.48	126.19	229.21	111.89	343.45	120.15
Patía (Pusmeo, NAR)	333.0	156.5	288.5	123.6	425.8	192.8
Bianco (Carlosama, NAR)	3.83	2.58	3.41	2.06	4.72	2.29
Mayo (La Canada, NAR)	14.12	5.65	13.38	5.36	15.34	5.06
Zona Andina, Centro						
Saldaña (P. de Cobre, TOL)	325.7	122.3	298.4	102.1	393.8	135.8
Prado (Boquerón, TOL)	54.7	33.2	45.1	29.7	67.5	42.3
Luisa (Pavo Real, TOL)	5.05	2.92	3.86	2.03	6.97	3.69
Magdalena (P. Stander, HUI)	484.68	177.24	457.38	187.94	545.85	147.76
Magdalena (P. Ficción, TOL)	732.68	275.38	659.91	280.37	886.72	284.14
Magdalena (Arrancaplumas, CUN)	1357.36	466.62	1168.09	428.38	1635.13	490.32
Magdalena (P. Berrío, ANT)	2439.95	794.58	2117.59	726.78	2968.31	812.55
Zona Andina, Oriente						
Pamplona (A. Claras, N. SAN)	26.55	24.84	16.84	14.77	41.14	31.76
Sogamos (El Tablazo, SAN)	447.9	248.9	392.1	242.4	552.1	242.9
Lebrija (Café Madrid, SAN)	19.27	10.20	16.53	7.69	25.73	13.70
Sumapaz (El Profundo, CUN)	19.74	13.28	15.64	11.35	25.79	12.15
Negro (Colorados, CUN)	86.78	74.4	69.7	53.20	129.32	96.18
Chivor (Ubalá, CUN)	3.89	3.24	3.88	3.54	4.33	3.47
Guavio (Chusneque, CUN)	29.05	21.05	29.12	23.02	34.13	20.30
Costa del Caribe						
Ranchería (El Cercado, GUA)	9.31	7.77	8.21	6.29	9.86	9.15
Garupal (Cantaclaro, CES)	1.88	2.24	1.35	1.48	1.96	1.95
Cesar (P. Salguero, CES)	34.82	38.68	31.90	38.40	41.30	41.93
Ariguaní (La Aurora, MAG)	16.62	7.95	15.87	7.15	18.86	10.30
Sinú (Urrá, COR)	348.4	169.3	312.5	165.3	379.9	168.0

Como puede deducirse de los gráficos de la figura 6, los valores de las correlaciones muestran claramente la influencia del SOI sobre la hidrología de Colombia. En las regiones de Colombia donde se siente con más fuerza tal influencia (occidente y zona Andina de Colombia: Antioquia Chocó, la zona cafetera, Cauca, Valle del Cauca, Santander, Tolima, Nariño, Cundinamarca), las correlaciones crecen desde casi cero (en -12 meses) hasta valores de 0.5-0.6 en retrasos de -3 a 0 meses. Los ríos sobre la costa de mar Caribe (departamentos de Magdalena, Cesar, Sucre, Guajira, Córdoba, Bolívar) muestran correlaciones mucho más bajas, ya que esta región parece estar más afectada por fenómenos oceánico-atmosféricos que ocurren sobre el O. Atlántico, como en el caso de la llamada Oscilación del Atlántico Norte (NAO). La señal del ENSO se manifiesta como una onda que viaja del oeste al este sobre el O. Pacífico y sobre el norte de América del Sur, en atmósfera y en superficie. Así, la señal se manifiesta en Guyana con un retraso de alrededor de seis meses (Eagleson, 1994).

Todo lo que se ha discutido hasta ahora permitiría concluir que las anomalías en los fenómenos hidrológicos están supeditadas a aquellas de los fenómenos oceánicos y atmosféricos. Sin embargo, el sistema océano-tierra-atmósfera es un sistema acoplado en donde no es posible definir inequívocamente el principio y el fin en las cadenas de causalidad. Los procesos que ocurren sobre tierra son fundamentales para determinar la evolución del clima: humedad del suelo, evaporación, calores sensible y latente, etc. (Delworth y Manabe, 1993; Koster y Suarez, 1995). En un trabajo diferente presentamos evidencia observacional que sugiere que las anomalías en tales procesos hidrológicos en la parte norte de América del Sur pueden estar influyendo en las anomalías de las temperaturas del mar Caribe y del Océano Atlántico tropical norte (Poveda y Mesa, 1995a, b), lo que significa que están ejerciendo un papel fundamental como "puente tierra-atmósfera" para conectar las anomalías climáticas que ocurren en los océanos Pacífico y Atlántico. Allí se pone de manifiesto que la hidrología no es un espectador pasivo en la dinámica de los procesos climáticos de gran escala, sino que tiene un rol definitivo, más aún cuando nos referimos a los procesos hidrológicos en el trópico.

6. PREDICCIONES DEL FENOMENO ENSO Y DE LA HIDROLOGIA DE COLOMBIA

Cada vez es mayor el número y el tipo de metodologías que se reportan en la literatura para la predicción de los fenómenos oceánico-atmosféricos asociados con el ENSO. Existen métodos dinámicos tales como el modelo acoplado híbrido de Barnett *et al.* (1993), el modelo acoplado del National Meteorological Center de Estados Unidos (Ji *et al.*, 1992), el modelo acoplado de Cane y Zebiak (1987), ver también Cane *et al.* (1986), y el modelo del Bureau of Meteorological Research Center de Australia (Kleeman, 1991). También existen métodos estadísticos como el de Modelación Lineal Inversa (Penland y Magorian, 1993), el método de análisis espectral singular de Keppenne y Ghil (1992), y el método de correlación canónica de NOAA (Barnston y Ropelewsky, 1992), entre otros. Tales resultados se consignan en documentos de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de Estados Unidos, como el *Forecast Bulletin* y el *Climate Diagnosis Bulletin*, y están disponibles en Mosaic a través de Internet en la dirección: http://nic.fb4.noaa.gov/products/analysis_monitoring.

Uno de los temas de mayor debate entre la comunidad predictiva del fenómeno ENSO es el de la llamada "barrera de predictibilidad", que se refiere a una pérdida de la capacidad de predicción de los modelos (especialmente los llamados dinámicos) hacia la época de la primavera del hemisferio Norte (marzo-mayo). El análisis estadístico de la serie del SOI (Tahiti-Darwin) presenta una caída en las correlaciones mensuales durante el mismo período del año (marzo-mayo), independientemente del mes en que se comienzan a estimar las correlaciones. Ver la figura 7, en la que se presentan las correlaciones adelantadas del SOI. Las diferentes curvas de la figura 7 muestran los valores del coeficiente de correlación entre los meses que se muestran sobre la abscisa y los meses que le siguen, comenzando en los diferentes meses del año. El período de análisis es 1940-1992 y la estimación de los coeficientes de correlación se realizó sin remover el ciclo anual. Puede observarse en la figura 7 que, independientemente del mes en que se comienzan las correlaciones rezagadas, se presenta una rápida caída en

los meses de la primavera del hemisferio Norte. Este comportamiento sugiere que es difícil predecir el comportamiento del SOI en los meses de la primavera, lo que a su vez parece indicar que el ciclo anual ejerce una influencia muy grande en la dinámica del ENSO. Véase una interesante discusión acerca de este punto en el trabajo de *Webster (1994)*. La figura 8 contiene básicamente la misma información que la figura 7, pero se presenta de manera diferente, lo cual permite apreciar algo que no es obvio en la figura 7. La figura 8 muestra el ciclo anual del coeficiente de correlación de retraso (hacia atrás) indicado por los números sobre las 6 curvas. Allí se observa de nuevo que el coeficiente de correlación entre los meses de la primavera y los meses precedentes disminuye drásticamente, para todos los retrasos, además se observa que para los meses del período diciembre-febrero, las correlaciones permanecen restringidas dentro de un intervalo estrecho de valores altos, independientemente del retraso con el que se quiera predecir tales meses. En el verano se presenta una alta dispersión en los coeficientes de correlación, para los diferentes retrasos. Estos resultados confirman la importancia del ciclo anual en la dinámica del ENSO.

Cabe entonces preguntarse si las variables hidrológicas que están influenciadas tan fuertemente por el ENSO (lluvias y caudales), heredan esta misma pérdida de capacidad predictiva de la primavera. Para responder la pregunta estudiamos el caso de los caudales medios mensuales en los ríos de Colombia y aquí presentamos los resultados para el Riogrande en la estación RG-8 (Antioquia) y para el río Magdalena en Puerto Berrío. Las figuras 9 y 10 son las correspondientes respectivas de las figuras 7 y 8, para el caso del Riogrande, y las figuras 11 y 12 son correspondientes a las figuras 7 y 8, para el río Magdalena en Puerto Berrío (Antioquia). En la figuras 9 y 11 se presentan las correlaciones comenzando en el mes de julio. Puede observarse que las correlaciones de los caudales decrecen más rápidamente para los caudales en el período julio-noviembre, pero tienen más memoria en el período diciembre-febrero. En los caudales no se presenta la caída en las correlaciones hacia el período marzo-mayo, pero si se observa una reducción drástica para el mes de septiembre, si se estiman las correlaciones antes del mes de julio, y aparece una recuperación en el mes de octubre. Aparentemente, la caída rápida en las correlaciones de los caudales se translada al

período julio-septiembre. Los resultados de la figura 10 y 12 para el caso de Riogrande y el Río Magdalena sugieren que es necesario considerar en mayor detalle las características del ciclo anual de las correlaciones rezagadas, para efectos de predicción. Estos rasgos deben reflejarse en la capacidad de predicción de los caudales en los diferentes meses del año.

El análisis de caudales sin remover el ciclo anual (como lo hemos comenzado a hacer aquí) debe arrojar luces acerca de la importancia del mismo ciclo anual en las anomalías hidrológicas asociadas a las fases extremas del ENSO. En sistemas y fenómenos no lineales, como son los de la interacción océano-tierra-atmósfera, estudiar únicamente las anomalías (desviaciones escaladas con respecto a la media) puede conducir a resultados e interpretaciones erróneas. La remoción del ciclo anual es una tarea delicada, y la estandarización común (restando la media y dividiendo por la desviación típica mensual) produce resultados equivocados. Tal procedimiento deja de lado una definición precisa, delicada y fundamental del ciclo anual. Un cuidadoso análisis de este punto es hecho por *Thomson (1995)*.

La predicción de las variables hidrológicas adquiere una nueva dimensión a la luz de la influencia que ejercen los fenómenos oceánico-atmosféricos a escala global. Tales fenómenos que presentan ciclos largos (del orden de varios años), o que son aperiódicos pero recurrentes, plantean la necesidad de usar herramientas de predicción diferentes a las que se han usado tradicionalmente en hidrología estocástica. La tarea de operación y manejo de embalses y de optimización de sistemas de recursos hidráulicos debe considerar tales efectos. Todo el análisis de persistencia, ciclicidades, tendencias, tipo de memoria de los procesos hidrológicos; lo referente al llamado fenómeno de Hurst en series temporales (*Mesa y Poveda, 1993*) debe tener en cuenta fenómenos cíclicos en distintas escalas de tiempo: el ciclo diurno, las oscilaciones de 4-5 días que se manifiestan en ondas del este sobre el Océano Atlántico y el mar Caribe (*Riehl y Malkus, 1958*), las oscilaciones de 30-60 días en la atmósfera tropical (conocidas también como oscilaciones de Madden-Julian), el ciclo anual, la Oscilación Cuasi-Bienal, una señal coherente en toda la estratósfera tropical que también está presente en el ENSO mismo (*Barnett, 1991; Dickey et al., 1994*), el fenómeno ENSO mismo,

los ciclos de 11 años en el número de las manchas solares, los ciclos del momento angular total de la Tierra asociados al acoplamiento de los movimientos del núcleo y el manto de terrestres (*Lambeck, 1980, p. 247*), para citar sólo aquellos que se manifiestan en escalas de tiempo de interés en proyectos de ingeniería.

Las herramientas que hemos comenzado a usar en el Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos para predicción hidrológica en distintas escalas de tiempo tratan de incorporar el efecto del ENSO y además las características no lineales de los procesos hidrológicos. Entre ellas, se mencionan los siguientes métodos: redes neuronales (*Mesa et al., 1994b*), análisis espectral singular (*Carvajal et al., 1994*), ecuaciones diferenciales estocásticas con potencial de doble pozo (*Salazar et al., 1994a*), procesos auto-regresivos dependientes del régimen (*Salazar et al., 1994b*), modelación lineal inversa (*Poveda y Penland, 1994*). Los resultados muestran una mejora importante en la capacidad de predicción con respecto a métodos tradicionalmente usados en hidrología.

CONCLUSIONES

Este trabajo presentan diversos análisis para cuantificar la dependencia de los caudales medios en Colombia con respecto al fenómeno ENSO y a las manifestaciones de sus fases extremas: El Niño y La Niña. El análisis de histogramas de frecuencias realizados a las series de caudales medios mensuales será de gran utilidad en las tareas de planificación y operación de sistemas de recursos hidráulicos hacia el futuro. Los demás análisis presentados en este trabajo tratan de profundizar en el conocimiento de la influencia del ENSO sobre las características espacio-temporales de la hidrología de Colombia. El índice tradicional del SOI se convierte en una herramienta útil para la predicción, especialmente en ríos de la región Andina en Colombia. Los mapas de iso-correlación entre las temperaturas del Océano Pacífico y los caudales también permiten confirmar las zonas del Océano Pacífico que tienen mayor influencia sobre la hidrología de Colombia. Finalmente, las características de predictibilidad del ENSO y de los caudales difieren, en términos de los coeficientes de correlación, ya que la barrera de predictibilidad no se presenta en el período marzo-mayo para los caudales aunque podría

pensarse que se desplaza para el período junio-septiembre. El ciclo anual parece estar jugando un papel mucho mayor en la dinámica del ENSO, más allá de la conocida pérdida de la capacidad de predicción en la primavera, ya que también se presenta una alta capacidad de predicción en los meses del período diciembre-febrero, tal como se presenta en la figura 8. Las herramientas que hemos comenzado a usar para propósitos de predicción hidrológica involucran la dependencia hidrológica con respecto a los fenómenos oceánico-atmosféricos de gran escala como el ENSO, así como también las características no lineales inherentes a los fenómenos geofísicos.

La existencia de ciclos irregulares de baja frecuencia en la hidrología colombiana cambia de manera significativa los modelos de optimización necesarios para el planeamiento de la operación y de la expansión de los aprovechamientos hidráulicos. Los modelos tradicionales son optimistas, subestiman el riesgo de racionamiento y llevan a situaciones no diseñadas de subinstalación (ver *Poveda y Mesa, 1993*).

Las negociaciones de energía de corto y largo plazo pueden producir oscilaciones en los precios. Esto es más crítico en un mercado que presenta rezagos sustanciales entre el momento de la decisión de inversión y de la producción efectiva (recuerde el teorema de la telaraña en microeconomía). Estas oscilaciones en los precios y en las inversiones pueden entrar en resonancia con los ciclos hidrológicos de baja frecuencia asociados al fenómeno ENSO. Los entes responsables de la política energética no pueden descuidar estos aspectos.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen a COLCIENCIAS de Colombia por el apoyo brindado para desarrollar esta investigación. Parte de este trabajo se realizó en el Center for the Study of Earth from Space/Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (CSES/CIRES) de la University of Colorado, Boulder, Colorado, Estados Unidos. Agradecemos la hospitalidad del personal de CSES/CIRES. Esta investigación se ha beneficiado de valiosas discusiones con los Drs. Vijay K. Gupta, Cécile Penland, Peter Webster, Henry Diaz, Chester Ropelewsky, Kevin Trenberth, George Kila-

dis, Klaus Weickman, Víctor Magaña, Ricardo Smith y José D. Pabón. Cécile Penland (CIRES) suministró los datos de temperaturas del Océano Pacífico de COADS. Kevin Trenberth y Dennis Shea del National Center for Atmospheric Research (Boulder) proporcionaron los datos del SOI.

REFERENCIAS

- Aceituno, P., On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: Surface climate. *Mon. Wea. Rev.*, 116, 505-524, 1988.
- Aceituno, P., On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part II: Upper-air circulation. *J. Climate*, 2, 341-355, 1989.
- Barnett, T. P., The interaction of multiple time scales in the tropical climate system, *J. Climate*, 4, 269-285. 1991.
- Barnett, T. B., M. Latif, N. Graham, M. Flugel, S. Pazan y W. White. ENSO and ENSO-related predictability: Part 1 - Prediction of equatorial Pacific sea surface temperatures with a hybrid coupled ocean-atmosphere model, *J. Climate*, 6, 1545-1566, 1993.
- Barnston, A. G. y C. F. Ropelewsky. Prediction of ENSO episodes using canonical correlation analysis. *J. Climate*, 5, 1316-1345. 1992.
- Cane, M. y S. E. Zebiak. 1987. Prediction of El Niño events using a physical model. En: *Atmospheric and Oceanic variability*, H. Cattle (ed.), Royal Met. Soc. Press, 153-182. 1987.
- Cane, M, S. E. Zebiak y S. C. Dolan. Experimental forecast of El Niño. *Nature*, 321, 827-832. 1986.
- Carvajal, L. F., O. J. Mesa, J. E. Salazar, y G. Poveda, Aplicación del análisis espectral singular a series hidrológicas en Colombia. *Memorias del XVI Congreso Latino-Americano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 3, 97-108. 1994.
- Cavazos, T., y S. Hastenrath, Convection and rainfall over Mexico and their modulation by the Southern Oscillation, *Intern. Jour. Climatol.*, 10, 377-386, 1990.
- Chu, P.-S., Brazil's climate anomalies and ENSO, En: Glantz, M., R. Katz, y N. Nicholls (eds.). *Teleconnections linking worldwide climate anomalies*. Cambridge University Press, 42-64, 1991.
- Delworth, T., y S. Manabe, Climate variability and land-surface processes, *Adv. Water Res.*, 16, 3-20, 1993.
- Diaz, H. F., y G. N. Kiladis, Atmospheric teleconnections associated with the extreme phases of the Southern Oscillation. En: *El Niño. Historical and paleoclimatic aspects of the Southern Oscillation* (H. F. Diaz y V. Markgraf, eds.). 1992.
- Diaz, H. F. y V. Markgraf (eds.). *El Niño. Historical and paleoclimatic aspects of the Southern Oscillation*. Cambridge University Press. 476 p. 1993.
- Dickey, J. O., S. L. Marcus, R. Hide, T. M. Eubanks, y D. H. Boggs. Angular momentum exchange among the solid Earth, atmosphere, and oceans: A case study of the 1982-1983 event, *J. Geophys. Res.*, 99, B12, 23921-23937, 1994.
- Eagleson, P. E., The evolution of modern hydrology (from watershed to continent in 30 years), *Adv. Water Res.*, 17, 3-18, 1994.
- Estoque, M. A., J. Luque, M. Chandeck-Monteza, y J. García, Effects of El Niño on Panama rainfall, *Geofísica Internacional*, 24, 355-381, 1985.
- Gessler, R. D., Precipitation variability over Ecuador associated with the El Niño/Southern Oscillation. Tesis no publicada de Master of Arts, Dept. Geography, University of Florida, Gainesville, Florida, U.S.A., 85 p., 1995.

- Glantz, M., R. Katz, y N. Nicholls (eds.). *Teleconnections linking worldwide climate anomalies*. Cambridge University Press. 535 p.1991.
- Halpert, M. S. y C. F. Ropelewsky, Surface temperature patterns associated with the Southern Oscillation . *J. Climate*, 5, 577-593, 1992.
- Hastenrath, S., Diagnostic and prediction of anomalous river discharges in northern South America . *J. Climate*, 3, 1080-1096, 1990.
- Hastenrath, S., y L. Greischar, Further work on the prediction of Northeast Brazil rainfall anomalies . *J. Climate*, 6, 743-758, 1993.
- Horel, J. D., y A. G. Cornejo-Garrido, Convection along the coast of northern Peru during 1983: Spatial and temporal variation of clouds and rainfall , *Mon. Wea. Rev.*, 114, 2091-2105, 1986.
- Horel, J. D., y J. M. Wallace. Planetary scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation , *Mon. Wea. Rev.*, 109, 813-829, 1981.
- Ji, M., A. Kumar y A. Leetma, A coupled ocean-atmospheric climate forecast system for ENSO predictions . Proceedings of the 7th Annual Climate Diagnosis Workshop. Norman, Oklahoma, Octubre 18-23, 391-395. 1992.
- Kayano, M. T., V. B. Rao, y A. D. Moura, Tropical circulations and the associated rainfall anomalies during two contrasting years . *Jour. Climatology*, 8, 477-488, 1988.
- Keppenne, C. y M. Ghil. Adaptive filtering and prediction of the Southern Oscillation Index. *Jour. Geoph. Res. (Atmospheres)*, 97, 20449-20454, 1992.
- Kiladis, G., y H. F. Diaz, Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation , *J. Climate*, 2, 1069-1090, 1989.
- Kleeman, R. A simple model of the atmospheric response to ENSO sea surface temperature anomalies , *J. Atmos. Sci.*, 48, 3-18. 1991.
- Koster, R. D. y M. J. Suarez, The relative contributions of land and ocean processes to precipitation variability: Summary of a GCM study . Sometido a *Jour. Geoph. Res.* 1995.
- Kousky, V. E., M. T. Kayano, y I. F. A. Cavalcanti, A review of the Southern Oscillation: oceanic-atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies . *Tellus*, 36A, 490-504, 1984.
- Lambeck, K., *The Earth's variable rotation* , Cambridge University Press, New York, 1980.
- Marengo, J., Interannual variability of surface climate in the Amazon basin. *Intern. Jour. Climatol.*, 12, 853-863, 1992.
- Marengo, J. A., y S. Hastenrath, Case studies of extreme climatic events in the Amazon basin . *J. Climate*, 6, 617-627, 1993.
- Mechoso, C. R., y G. Perez Iribaren, Streamflow in southeastern South America and the Southern Oscillation . *J. Climate*, 5, 1535-1539. 1992.
- Mesa, O. J., y G. Poveda, The Hurst effect: The scale of fluctuation approach . *Water Res. Res.*, 29, 3995-4002, 1993.
- Mesa, O. J., G. Poveda, L. F. Carvajal y J. E. Salazar, Efecto del fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur en la hidrología Colombiana , *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología*, Vol. 3, IAHR, Santiago de Chile, 373-384, 1994a.
- Mesa, O. J., L. F. Carvajal, J. E. Salazar y G. Poveda, Predicción hidrológica usando redes neuronales , *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 3, 385-396, 1994b.
- Montealegre, J. E. y Pabón, J. D. Características climáticas relevantes durante la ocurrencia de fenómenos ENOS en el nor-occidente suramericano . HIMAT. Bogotá. 1992.

- Obregon, G. O., y C. A. Nobre, Principal component analysis of precipitation fields over the Amazon river basin. *Climanálise*, 5, 35-46, 1990.
- Penland, C., y T. Magorian. Prediction of Nino 3 sea-surface temperatures using linear inverse-modeling. *J. Climate*, 6, 1067-1076. 1993.
- Philander, S. G. *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*, Academic Press, San Diego, CA, U.S.A., 293 p., 1990.
- Poveda, G., y O. J. Mesa. 1993. Metodologías de predicción de la hidrología Colombiana considerando el evento El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), *Revista Atmósfera*, 20, Sociedad Colombiana de Meteorología, Bogotá, 26-39.
- Poveda, G., 1994. Funciones Ortogonales Empíricas en el análisis de la relación entre los caudales medios en Colombia y las temperaturas de los océanos Pacífico y Atlántico, *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 4, 131-144.
- Poveda, G., O. J. Mesa, L. F. Carvajal, y J. E. Salazar. 1994. Lluvias en Colombia: Correlación con el clima del Océano Pacífico y Análisis de Funciones Ortogonales Empíricas, *Memorias del XVI Congreso Latino-Americano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 4, 93-105.
- Poveda, G., y C. Penland. 1994. Predicción de caudales medios en Colombia usando Modelación Lineal Inversa, *Memorias del XVI Congreso Latino-Americano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 4, 119-129.
- Poveda, G., y O. J. Mesa. 1995a. The Relationship between ENSO and the hydrology of tropical South America. The case of Colombia. *Proceedings of the Fifteenth Annual American Geophysical Union Hydrology Days*, Atherton, CA, USA, Hydrology Days Publications, 227-236.
- Poveda, G., y O. J. Mesa. 1995b. Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large scale oceanic-atmospheric phenomena, sometido a *Water Resources Research*.
- Poveda, G. Mesa, O. J. 1995c. Las fases extremas del fenómeno ENSO-El Niño y La Niña- y su influencia sobre la hidrología de Colombia. En imprenta en *Ingeniería Hidráulica en México*.
- Poveda, G. y Mesa, O.J. 1995d. Efectos hidrológicos de la deforestación. Sometido a consideración de *Energética*.
- Pulwarty, R. S., y H. F. Diaz, A study of the seasonal cycle and its perturbation by ENSO in the tropical Americas. *IV Inter. Conf. South. Hem. Met. Ocean*, American Meteorological Society, 262-263, 1993.
- Pulwarty, R. S., R. G. Barry, y H. Riehl, Annual and seasonal patterns of rainfall variability over Venezuela. *Erdkunde*, 46, 273-289, 1992.
- Rao, V. B., y K. Hada, Characteristics of rainfall over Brazil: Annual variations and connections with the Southern Oscillation. *Theor. Appl. Climatol.*, 42, 81-91, 1990.
- Rasmusson, E. M., y T. Carpenter, Variations in tropical SST and surface wind fields associated with the Southern Oscillation / El Niño. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 354-380. 1982.
- Richey, J. E., C. Nobre, y C. Deser, Amazon river discharge and climate variability: 1903 to 1985". *Science*, 246, 101-103, 1989.
- Riehl, H., y J. S. Malkus, On the heat balance in the equatorial trough zone. *Geophysica*, 6, 505-538, 1958.
- Rogers, J. C., The association between the North Atlantic Oscillation and the Southern oscillation in the northern hemisphere. *Mon. Wea. Rev.*, 112, 1999-2015, 1984.
- Rogers, J. C., Precipitation variability over the Caribbean and tropical Americas associated with the Southern Oscillation. *J. Climate*, 1, 172-182, 1988.

- Ropelewsky, C. F. y M. S. Halpert, Global and regional scales precipitation associated with El Niño/Southern Oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, 115, 1606-1626, 1987.
- Salazar, J. E., O. J. Mesa, G. Poveda y L. F. Carvajal, Aplicación de un modelo continuo no lineal de series hidrológicas, *Memorias del XVI Congreso Latino-Americano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 4, 169-180, 1994a.
- Salazar, J. E., O. J. Mesa, G. Poveda y L. F. Carvajal, Modelamiento del fenómeno ENOS en la hidrología colombiana mediante procesos autoregresivos dependientes del régimen, *Memorias del XVI Congreso Latino Americano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 4, 181-191, 1994b.
- Schukla, J., C. A. Nobre, y P. Sellers. Amazon deforestation and climate change, *Science*, 247, 1322-1325, 1990.
- Slutz, R. J., S. J. Lubker, J. D. Hiscox, S. D. Woodruff, R. L. Jenne, D. H. Joseph, P. M. Steurer, y J. D. Elms, 1985. *Comprehensive ocean-atmosphere data set*, 268 pp., Release 1, NOAA ERL, Boulder, Colorado, 1985.
- Tapley, P. R., y P. R. Waylen, Spatial variability of annual precipitation and ENSO events in western Peru, *Hydrological Sciences-Journal*, 35, 429-446. 1990.
- Thomson, D. J. The seasons, global temperature and precession, *Science*, 268, 59-68, 1995.
- Trenberth, K., General characteristics of El Niño-Southern Oscillation. En: *Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies*, R. M. Glantz, R. Katz, y N. Nicholls (eds.), pp. 13-42, Cambridge University Press, 1991.
- Van Loon, H., y R. A. Madden. The Southern Oscillation, I, Global associations with pressure and temperature in northern winter. *Mon. Wea. Rev.*, 109, 1150-1162, 1981.
- Volland, H., *Atmospheric Tidal and Planetary Waves*, Kluwer. Dordrecht, 348 p., 1988.
- Waylen, P. R., y C. N. Caviedes, El Niño and annual floods on the northern Peruvian littoral, *J. Hydrol.*, 89, 141-156, 1986.
- Waylen, P. R., M. E. Quesada, y C. N. Caviedes, The effects of El Niño-Southern Oscillation on precipitation in San José, Costa Rica, *Inter. Jour. Climatol.*, 14, 559-568, 1994.
- Webster, P. J., The annual cycle and the predictability of the tropical coupled ocean-atmosphere system. En imprenta en *Meteorol. Atmos. Phys.*, 1995.

Figura 1. Histogramas de frecuencias de caudales medios mensuales para el río Magdalena en Puerto Berrío (Antioquia), para el registro total y para años de El Niño y La Niña.

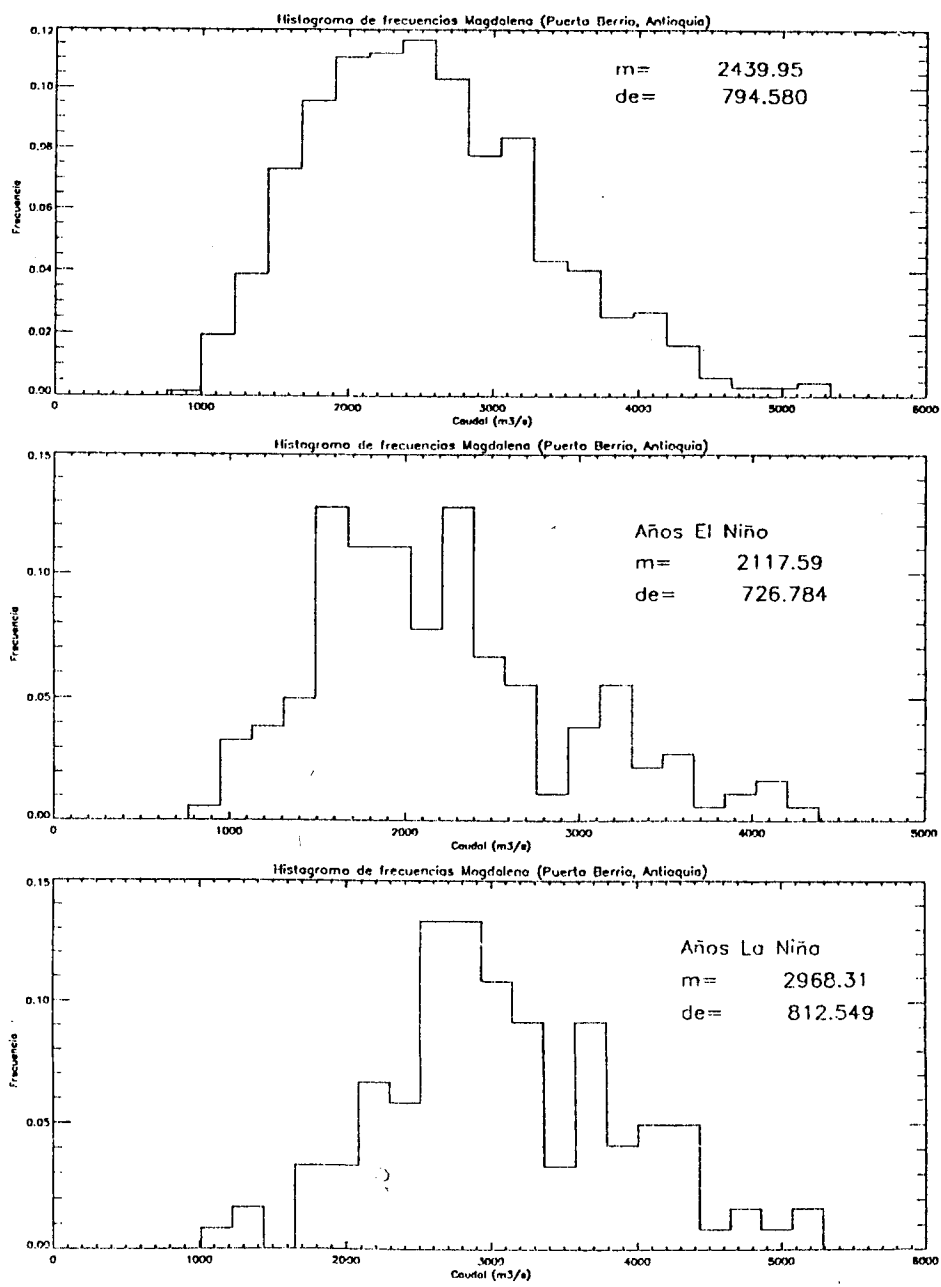


Figura 2.(a) Ciclo anual de la media de los caudales mensuales del río Magdalena en Puerto Berrio (Antioquia) para el registro total (+), para los años de El Niño (Δ) y para los años de La Niña (\square). (b) Ciclo anual de la desviación típica. (c) y (d) gráficos de las relaciones anomalía/caudal, en porcentaje, para la media y para la desviación típica, respectivamente.

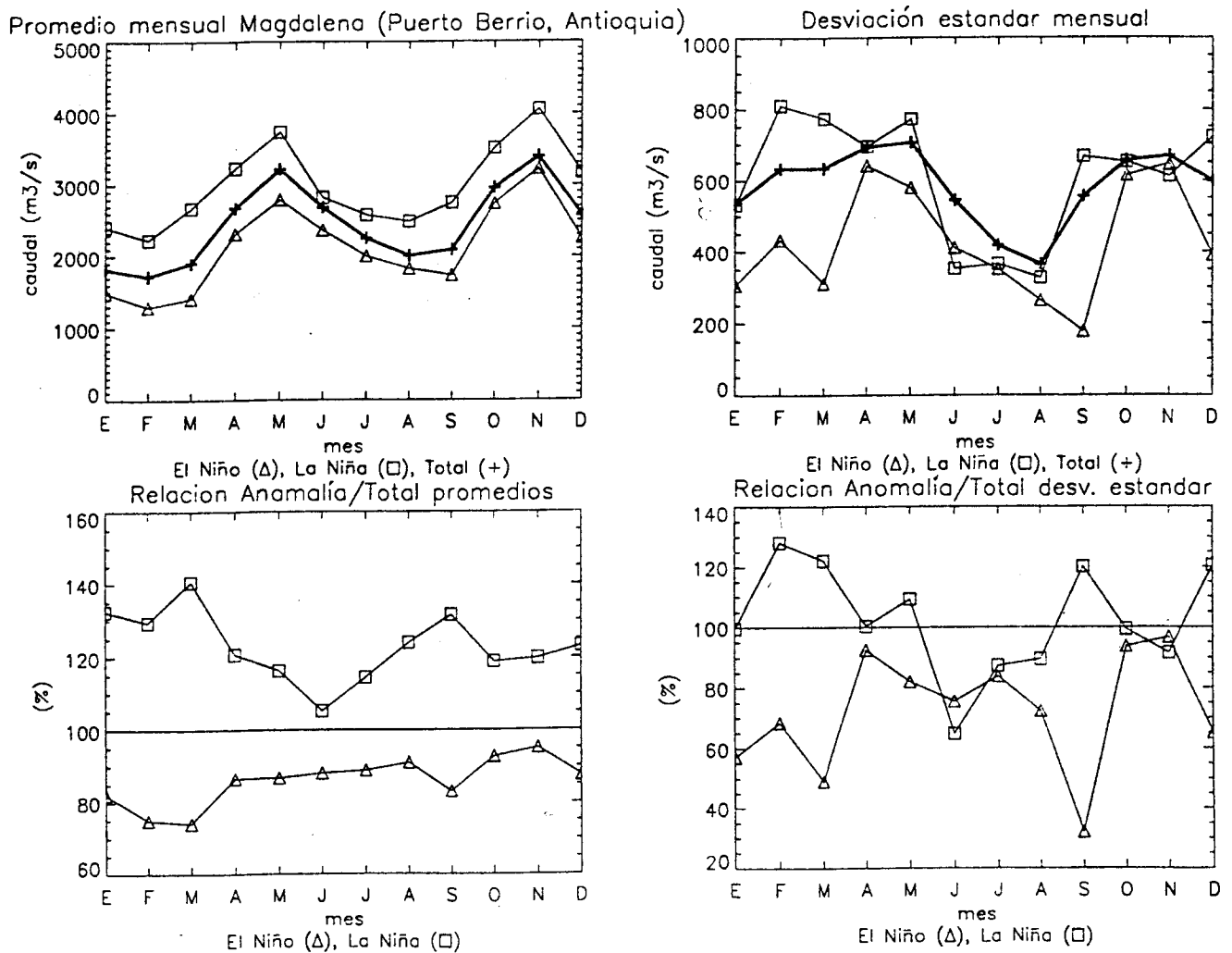


Figura 3. Similar a la figura 1 pero para el Riogrande en la estación RG-8 (Antioquia).

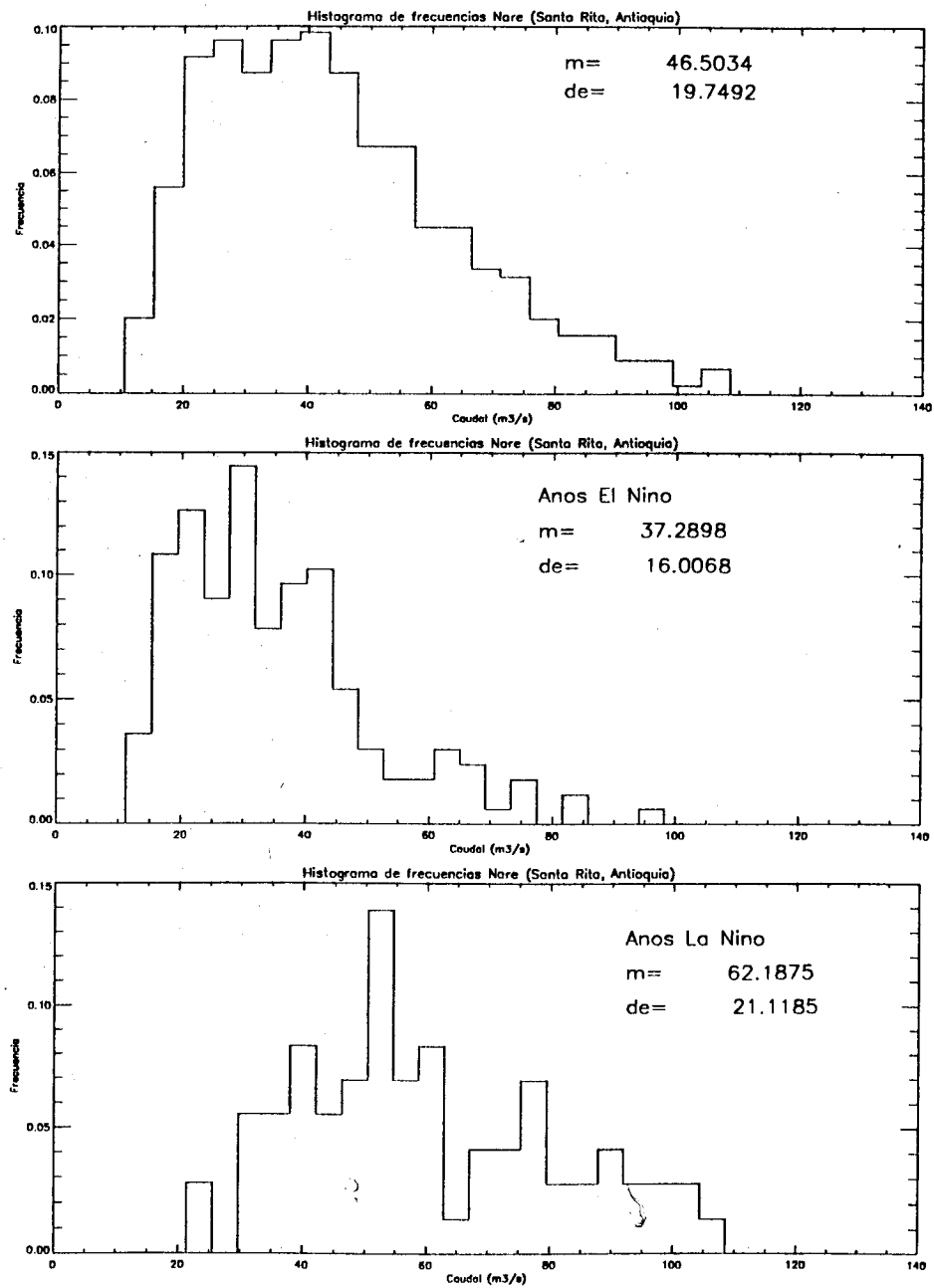


Figura 4. Similar a la figura 2 pero para el Riogrande en la estación RG-8 (Antioquia).

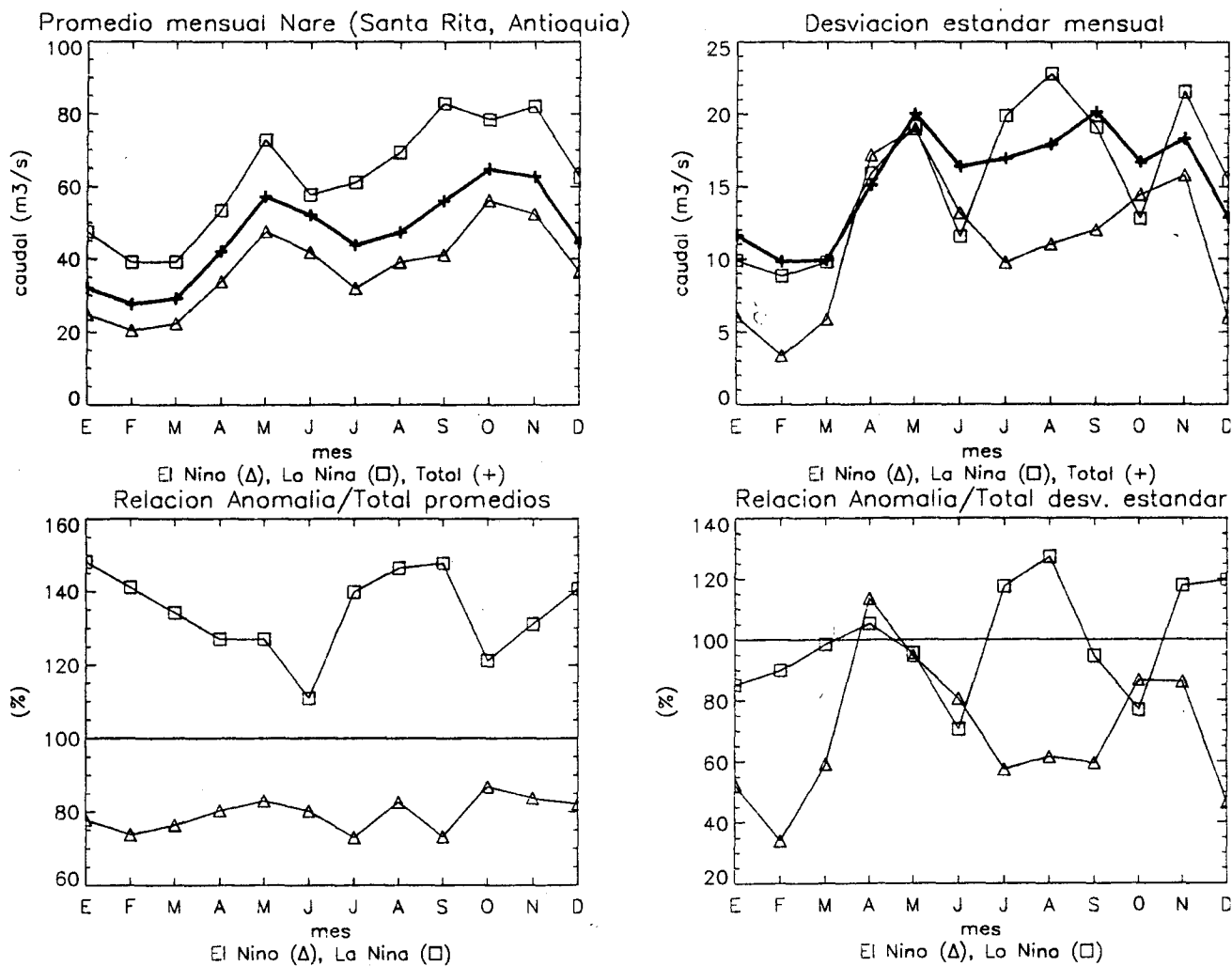


Figura 5. Iso-correlaciones (%) entre las temperaturas del mar en los océanos Indo y Pacífico y los caudales medios de los ríos: (a) Magdalena (Puerto Berrío, Antioquia), (b) Riogrande (RG-8, Antioquia), (c) Lebrija (Café Madrid, Santander), y (d) Ariguani (La Aurora, Magdalena).

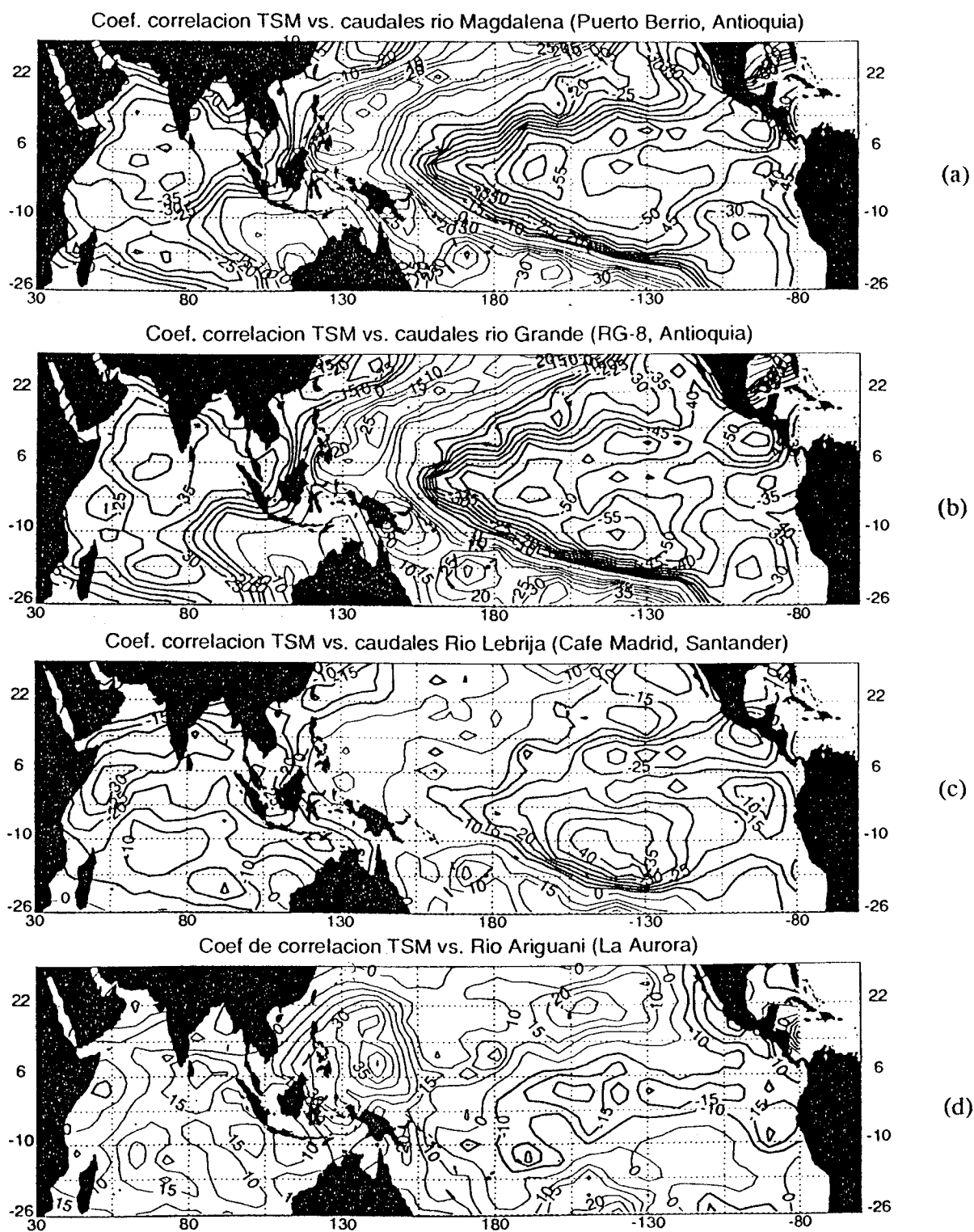


Figura 6. Correlaciones cruzadas entre los caudales medios mensuales (promedios móviles de 6 meses) y el SOI. Los valores negativos del rezago corresponden al SOI adelante de los caudales.

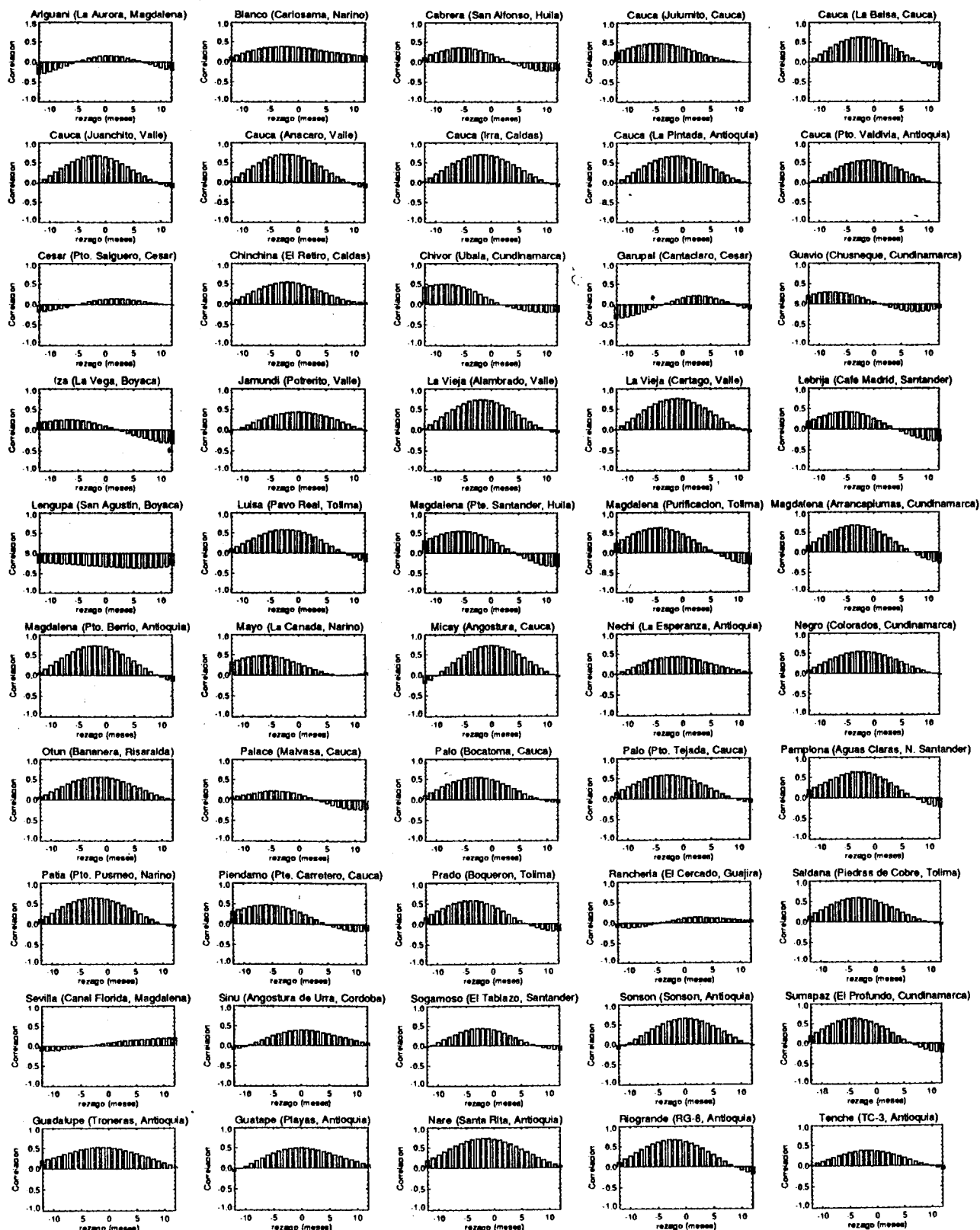


Figura 7. Coeficiente de correlación para el SOI entre los meses presentados en la abscisa y los meses que le siguen, para el período 1940-1992. Cada curva representa las correlaciones estimadas comenzando en los diferentes meses del año.

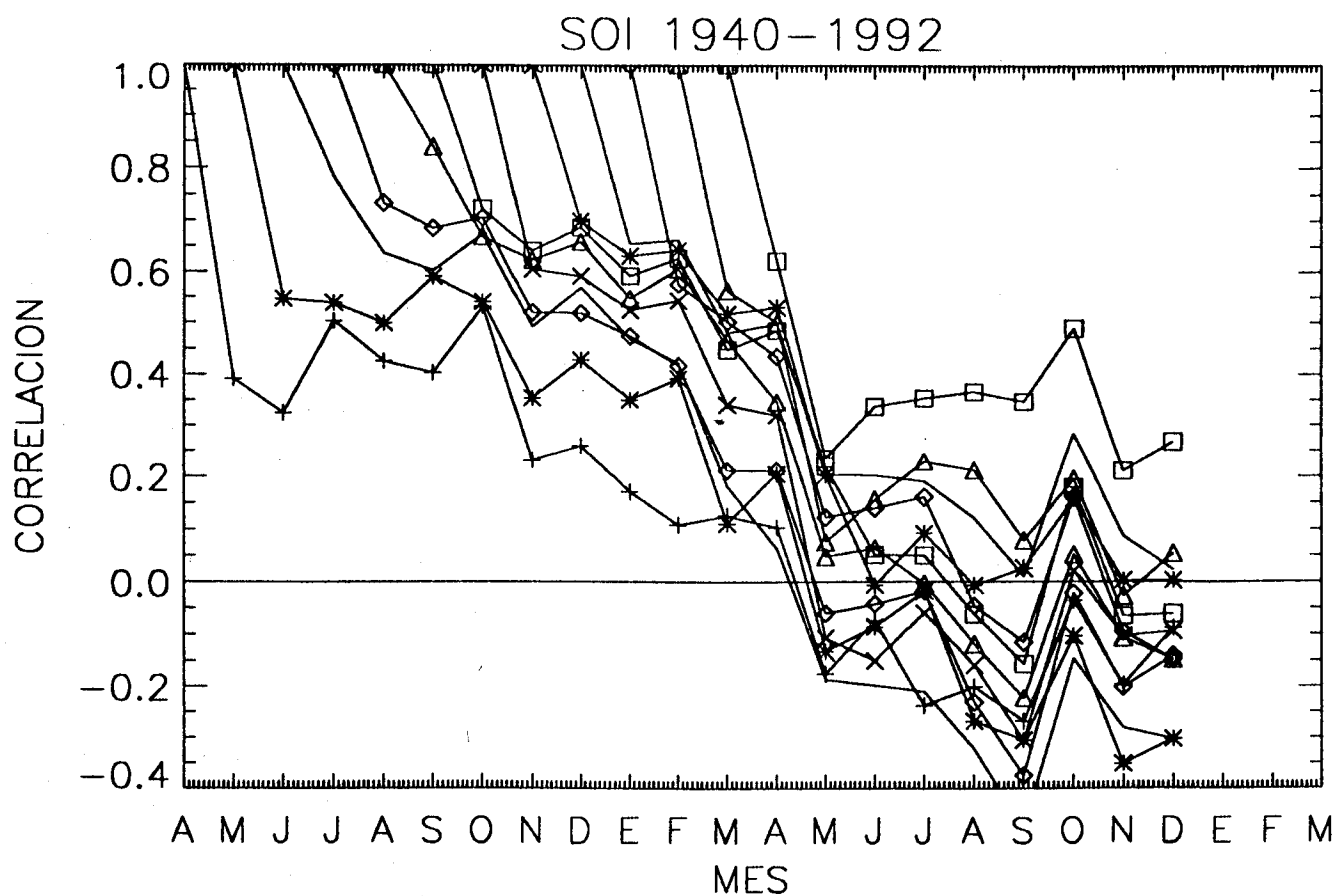


Figura 8. Ciclo anual de los coeficientes de correlación mensual. Se trata de las correlaciones entre los meses indicados en la abscisa y los meses precedentes. El rezago en meses se indica con el número sobre cada curva.

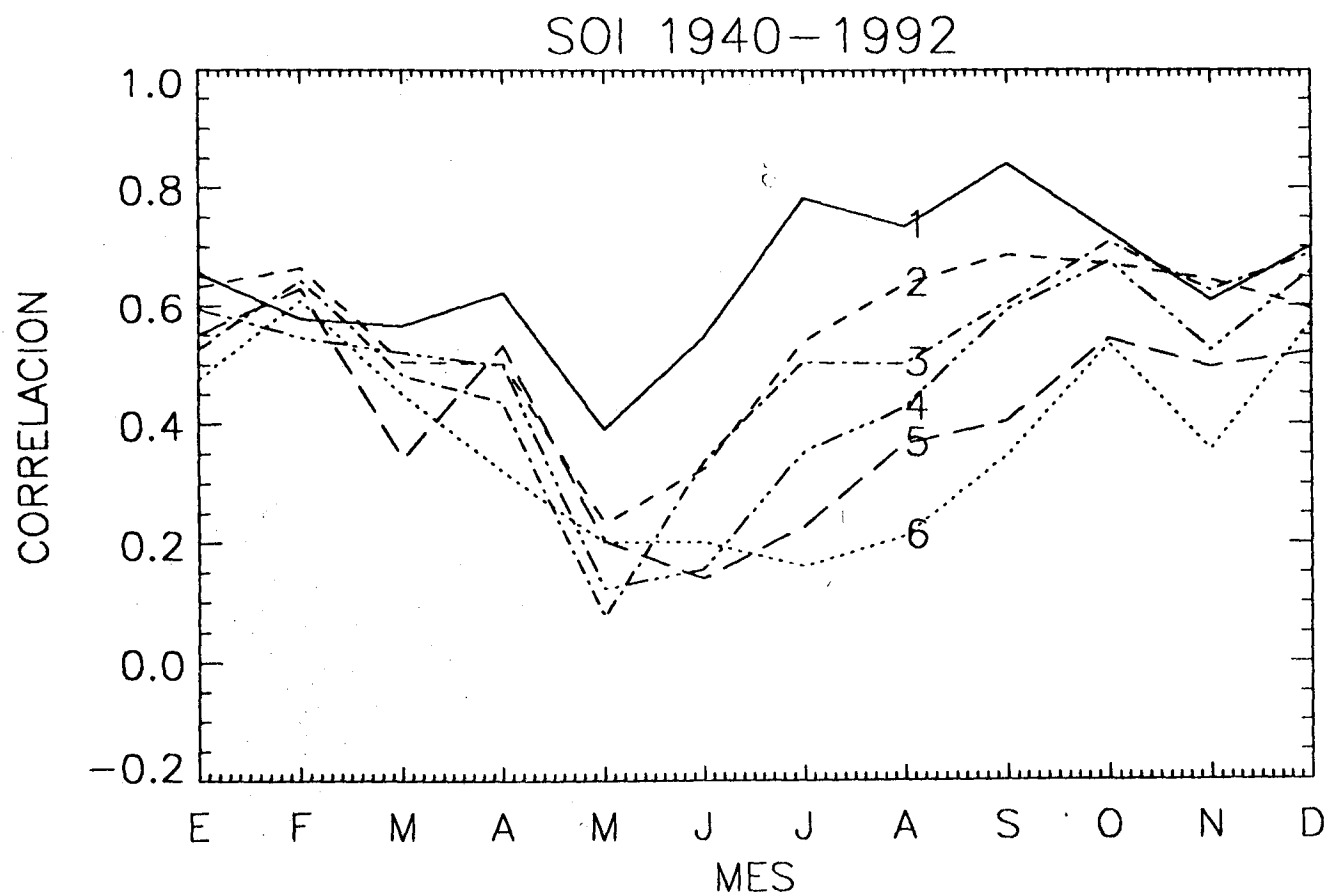


Figura 9. Similar a la figura 7 pero para el Riogrande (RG-8, Antioquia) y para el período 1942-1992.

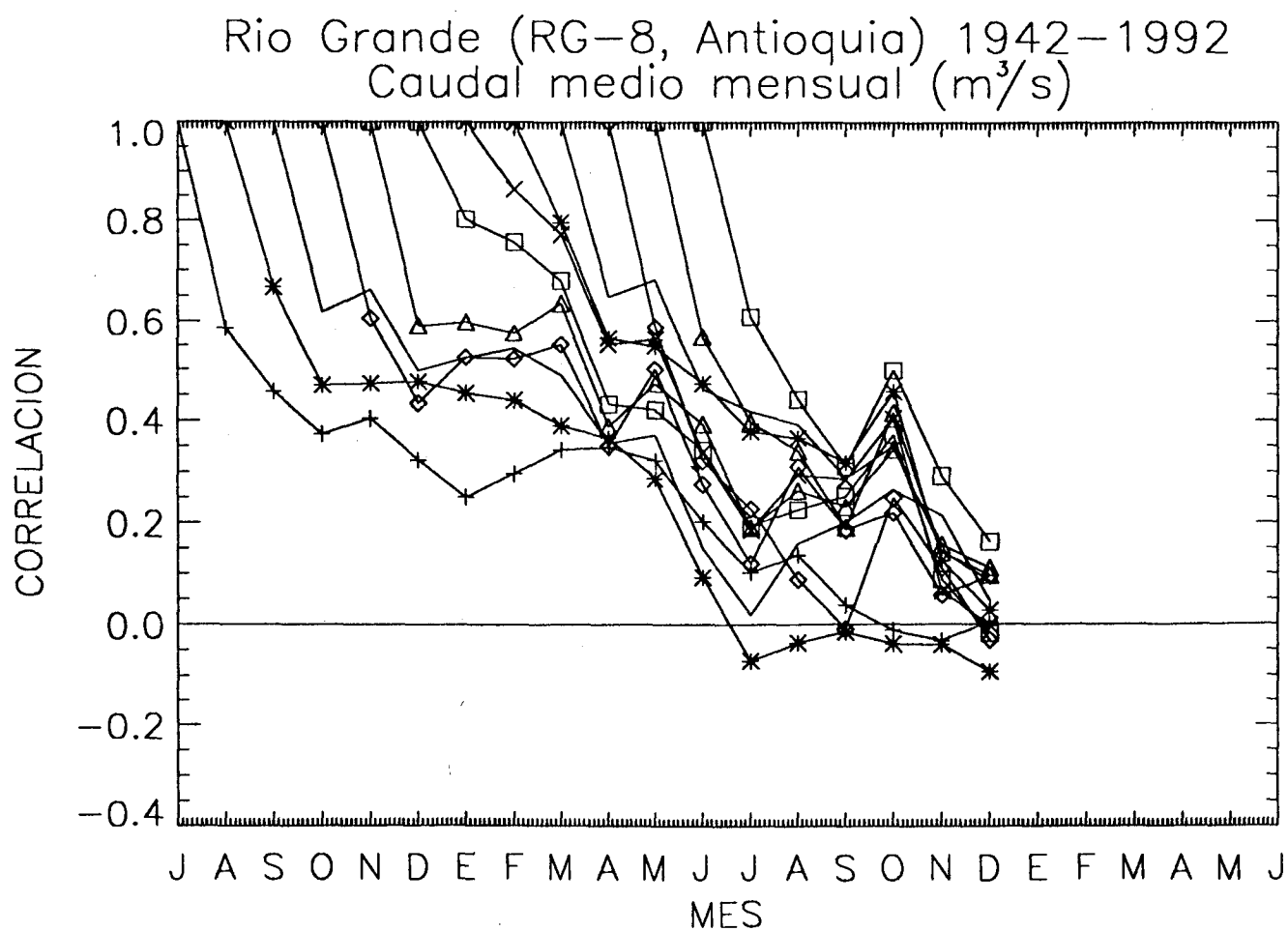


Figura 10. Similar a la figura 8 pero para el Riogrande (RG-8, Antioquia) y para el período 1942-1992.

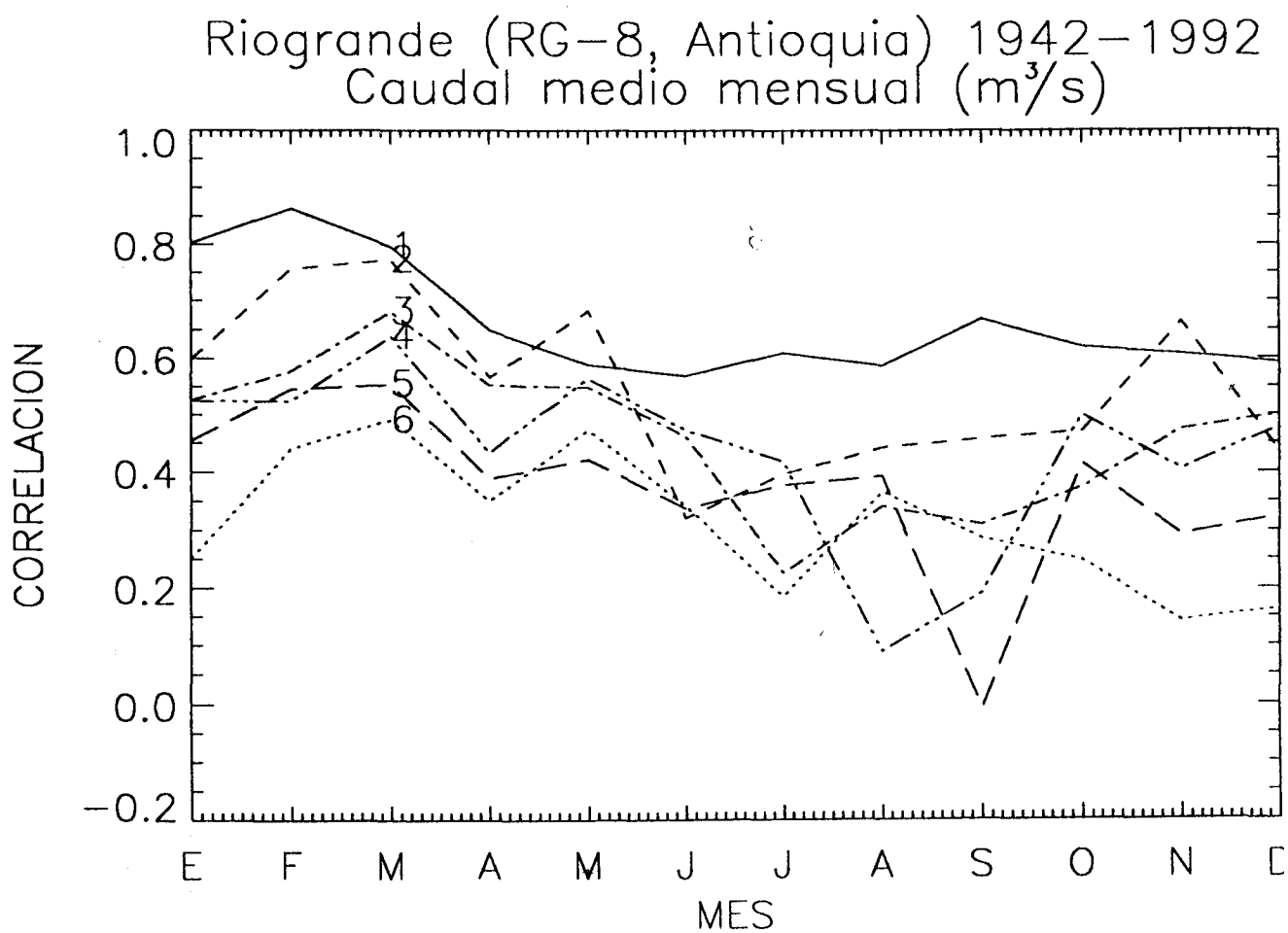


Figura 11. Similar a la figura 7 pero para el río Magdalena (Puerto Berrío, Antioquia) y para el período 1936-1992.

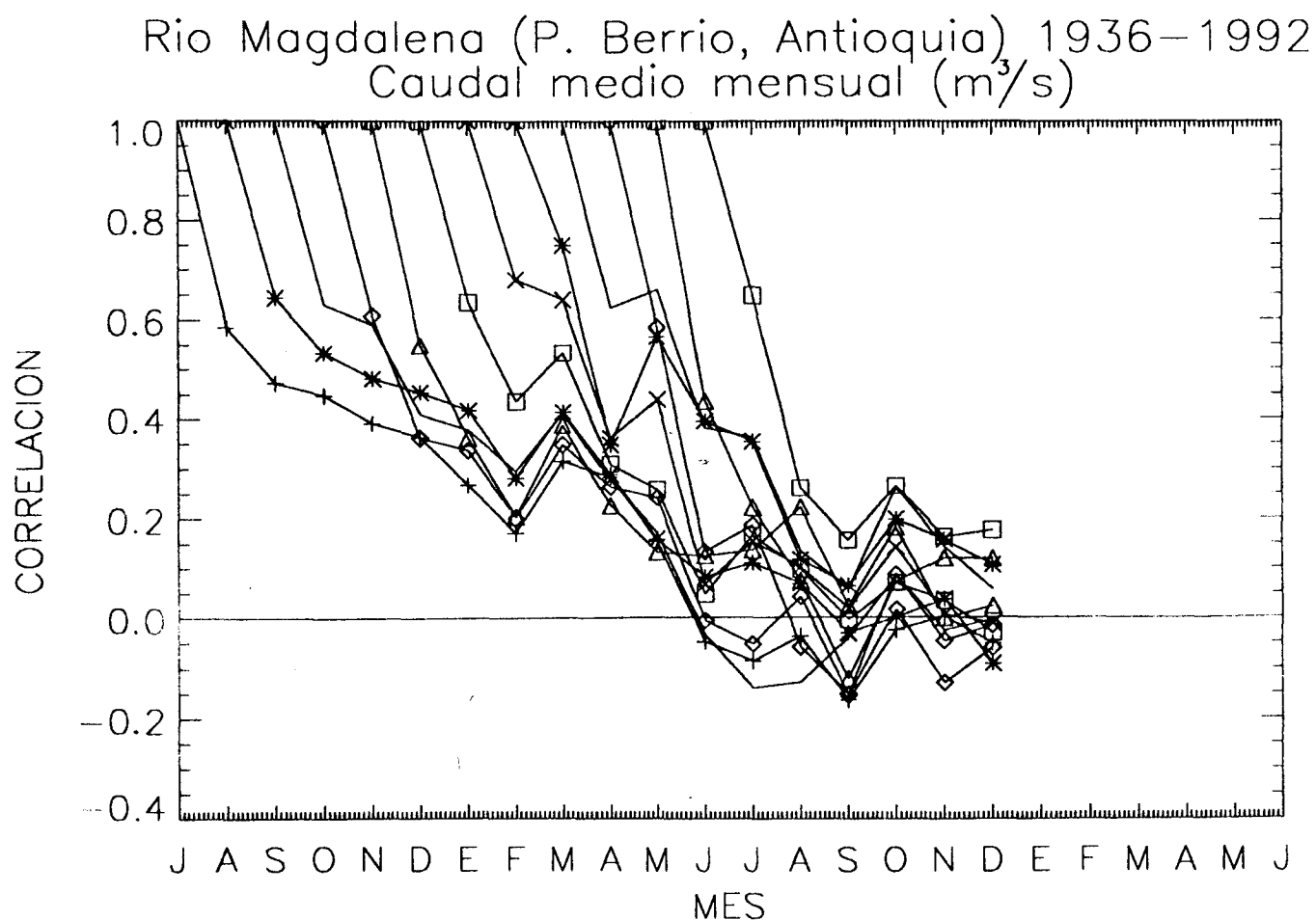


Figura 12. Similar a la figura 8 pero para el río Magdalena (Puerto Berrío, Antioquia) y para el período 1936-1992.

